

**М.І. ГАСАНОВ, О.О. КЛОЧКО, О.Ю. ЗАКОВОРТНИЙ, Є.В. ПЕРМІНОВ**

## **ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РЕГЛАМЕНТ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ ВІДНОВЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ВІДКРИТИХ ЗУБЧАТИХ ПЕРЕДАЧ**

На підставі узагальнених теоретичних залежностей, які визначають взаємозв'язок критеріїв якості поверхневого шару з технологічними параметрами процесу різання розроблена методика розрахункового визначення залишкових напружень в поверхневому шарі оброблених зношених і відновлених великогабаритних зубчатих коліс черв'ячними модульними і спеціальними немодульними фрезами при швидкісному зубофрезеруванні. Методика розрахункового визначення залишкових напружень в поверхневому шарі дозволяє призначити режими різання виходячи з необхідної величини шорсткості, глибини наклепу, рівня залишкових напружень. Результати досліджень дозволяють вирішувати завдання по визначенню параметрів поверхневого шару обробленої деталі, а також призначити технологічні умови обробки, що забезпечують задані технічними умовами параметри поверхневого шару. Розроблено процес моделювання роботи циліндричних крупномодульних загартованих коліс в порівнянні з результатами теоретичних досліджень і даними, отриманими на експериментальних установках і при дослідженні на «робочих осях» та визначено оптимальні значення параметрів стану робочих поверхонь циліндричних крупномодульних коліс, що забезпечують необхідні експлуатаційні властивості.

**Ключові слова:** технологічний регламент, оптимізація, відновлення, функціональні властивості, крупногабаритні відкриті зубчаті передачі, критерії якості поверхневого шару, технологічні параметри.

**М.И. ГАСАНОВ, А.А. КЛОЧКО, А.Ю. ЗАКОВОРТНЫЙ, Е.В. ПЕРМИНОВ**

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОТКРЫТЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ**

На основании обобщенных теоретических зависимостей, устанавливающих взаимосвязь критериев качества поверхностного слоя с технологическими параметрами процесса резания разработана методика расчетного определения остаточных напряжений в поверхностном слое обрабатываемых изношенных и восстановленных крупногабаритных зубчатых колес червячными модульными и специальными немодульными фрезами при скоростном зубофрезеровании. Методика расчетного определения остаточных напряжений в поверхностном слое позволяет назначить режимы резания исходя из требуемой величины шероховатости, глубины наклепа, уровня остаточных напряжений. Результаты исследований позволяют решать задачи по определению параметров поверхностного слоя обрабатываемой детали, а также назначать технологические условия обработки, обеспечивающие заданные техническими условиями параметры поверхностного слоя. Разработан процесс моделирования работы цилиндрических крупномодульных закаленных колес в сравнении с результатами теоретических исследований и данными, полученными на экспериментальных установках и при исследовании на «рабочих осях» и определены оптимальные значения параметров состояния рабочих поверхностей цилиндрических крупномодульных колес, обеспечивающие требуемые эксплуатационные свойства.

**Ключевые слова:** технологический регламент, оптимизация, восстановление, функциональные свойства, крупногабаритные открытые зубчатые передачи, критерии качества поверхностного слоя, технологические параметры.

**M. HASANOV, O. KLOCHKO, O. ZAKOVOROTNYI, Ye. PERMINOV**

## **TECHNOLOGICAL REGULATION OF OPTIMIZATION OF SYSTEMS OF RESTORATION OF FUNCTIONAL PROPERTIES OF LARGE-SIZED OPEN GEAR TRANSMISSIONS**

On the basis of the generalized theoretical dependences establishing the relationship between the criteria for the quality of the surface layer and the technological parameters of the cutting process, a technique has been developed for the calculation of the residual stresses in the surface layer of treated worn and repaired large-sized gears with worm modular and special non-modular cutters for high-speed gear milling. The method of calculating the residual stresses in the surface layer allows us to assign cutting regimes based on the required roughness value, the depth of hardening, the level of residual stresses. The results of the research allow solving problems in determining the parameters of the surface layer of the workpiece, and also assign technological processing conditions that ensure the parameters of the surface layer specified by the technical conditions. The process of simulating the operation of cylindrical coarse-grained hardened wheels is compared with the results of theoretical studies and data obtained in experimental installations and in research on "working axes" and the optimum values of the state parameters of the working surfaces of cylindrical coarse-grained wheels providing the required operational properties are determined.

**Keywords:** technological regulations, optimization, restoration, functional properties, large open gears, surface layer quality criteria, technological parameters.

**Постановка проблеми.** Завдання моделювання технологічних процесів оптимального управління параметрами точності, якості і продуктивності зубообробки зношених і відновлювальних крупногабаритних зубчатих коліс пропонується вирішувати методами технологічного впливу з урахуванням специфічних умов формоутворення зубчатих коліс [1, 2, 10].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Аналіз причин виходу з ладу великогабаритних зубчатих коліс показав, що в 90% руйнування великогабаритних зубчатих коліс починається з поверхневого шару через появу мікротріщин,

абразивного зносу, викрашування активних поверхонь зубів, відшаровування поверхневого шару зубів, прогресуючого заїдання, пластичних деформацій зубів [3, 4, 5, 8].

При зубофрезеруванні евольвентної поверхні зубчатого колеса переміщення ріжучого леза інструмента з початкового положення в кінцеве положення під дією керуючих впливів може бути здійснено за різними траєкторіями в рамках технологічних і техніко-економічних обмежень. Кожній траєкторії відповідає певне значення критерію оптимальності. Геометрія проектованої передачі визначається параметрами вихідного контуру

© М.І. Гасанов, О.О. Клочко, О.Ю. Заковортний, Є.В. Пермінов, 2018

інструмента і його зсувами при нарізанні коліс передачі.

Тому при проектуванні насамперед слід задати початковий контур інструменту і вибрати розрахункові зміщення. Якщо циліндричне зубчасте колесо нарізається рейковим інструментом, то верстатне зачеплення розглядають в торцевій площині, перпендикулярній осі зубчатого колеса.

**Мета роботи** – розробка взаємозв'язків технологічного впливу параметрів зачеплення зубів важконавантажених крупногабаритних зубчатих передач і їх відновлення.

#### Виклад основного матеріалу

При виготовленні циліндричних зубчатих коліс, які працюють при високих знакозмінних навантаженнях в умовах високих контактних напруг, потрібно витримувати задані параметри якості поверхневого шару, зокрема шорсткість поверхні, глибину і ступінь наклепу, залишкові напруги. На підставі узагальнених теоретичних залежностей, які визначають взаємозв'язок критеріїв якості поверхневого шару з технологічними параметрами процесу різання розроблена методика розрахункового визначення залишкових напружень в поверхневому шарі оброблюваних зношених і відновлених великогабаритних зубчастих коліс черв'ячними модульними і спеціальними немодульними фрезами при швидкісному зубофрезеруванні. Методика розрахункового визначення залишкових напружень в поверхневому шарі дозволяє призначити режими різання з необхідної величини шорсткості, глибини наклепу, рівня залишкових напружень.

Розрахунок залишкових напружень, обумовлених структурними і фазовими перетвореннями ґрунтується на розрахунку температурних залишкових напруг і залишкових напружень, обумовлених силовим впливом на поверхневий шар. Оскільки залишкові напруги є пружними, для складання пружних залишкових напруг використовується метод накладення, сумарні залишкові напруги визначаються алгебраїчним підсумовуванням температурних і силових залишкових напружень. Для того щоб визначити залишкові напруги від кожного фактора окремо, необхідно встановити закономірність розподілу температури в поверхневому шарі оброблюваних циліндричних загартованих крупномодульних зубчатих коліс, а також визначити зусилля різання, що діють на оброблювану поверхню.

$$\sigma_{\text{ост.т}} = -\sigma_T + \frac{\beta_{\text{д}} A_1 E_{\text{д}}}{1-\mu} \left\{ \left( \frac{H-y+a_1}{a_1} \right)^{x_2} - \frac{a_1^{1+x_2} - (H+a_1)^{1+x_2}}{a_1^{x_2} (1+x_2) H} \right\}, \quad (1)$$

$$\text{при } y = y_{\text{он}}; \sigma_{0\text{max}} < 2\sigma_T \quad \sigma_{\text{ост.т}} = \frac{\beta_{\text{д}} A_1 E_{\text{д}}}{1-\mu} x$$

$$\left\{ \frac{\frac{E_{\text{д}}}{a_1^{x_2} (1+x_2)} [(H+a_1-y)^{1+x_2} - (H+a_1)^{1+x_2}] + (1-\mu)\sigma_T(H-y_{\text{он}})}{E_{\text{д}} y_{\text{он}}} + \frac{a_1^{1+x_2} - (H+a_1)^{1+x_2}}{a_1^{x_2} (1+x_2) H} \right\} \quad (2)$$

$$y = y_0; \sigma_{0\text{max}} = 2\sigma_T$$

$$y < y_{\text{он}}; \sigma_{0\text{max}} = 2\sigma_T \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{ост.т}} = \sigma_T + \frac{\beta_{\text{д}} A_1 E_{\text{д}}}{1-\mu} \left\{ \left( \frac{H-y+a_1}{a_1} \right)^{x_2} + \frac{\frac{E_{\text{д}}}{a_1^{x_2} (1+x_2)} [(H+a_1-y_{00})^{1+x_2} - (H+a_1)^{1+x_2}] + 2(1-\mu)\sigma_T(H-y_{00})}{E_{\text{д}} y_{00}} \right\} \quad (4)$$

$$\text{при } \begin{cases} y_{00} > y \geq y_{\text{он}} \\ \sigma_{0\text{max}} = 2\sigma_T \end{cases}$$

$$\sigma_{\text{ост.т}} = \frac{\beta_{\text{д}} A_1 E_{\text{д}}}{1-\mu} \left\{ \frac{\frac{E_{\text{д}}}{a_1^{x_2} (1+x_2)} [(H+a_1-y_{00})^{1+x_2} - (H+a_1)^{1+x_2}] + 2(1-\mu)\sigma_T(H-y_{00})}{E_{\text{д}} y_{00}} - \frac{\frac{E_{\text{д}}}{a_1^{x_2} (1+x_2)} [(H-a_1-y_{\text{он}})^{1+x_2} - (H-a_1)^{1+x_2}] + (1-\mu)\sigma_T(H-y_{\text{он}})}{E_{\text{д}} y_{\text{он}}} \right\} \quad (5)$$

$$\text{де } \begin{cases} y < y_{\text{он}} \\ \sigma_{0\text{max}} = 2\sigma_T \end{cases}$$

де  $H$  - твердість оброблюваного зубчастого колеса;  $HВ$ ,  $\sigma_{\text{ост.т}}$  - напруги на поверхні при охолодженні;  $y$  - глибина залягання розглянутого шару від поверхні;  $y_{\text{он}}$ ,  $y_{\text{то}}$  - кордону розділу пружних і пластичних деформацій при нагріванні і пластичних деформацій при нагріванні і охолодженні;  $\sigma_T$ ,  $E_{\text{д}}$  - межа плинності і модуль пружності оброблюваного матеріалу;  $\beta_{\text{д}}$  і  $\mu$  - коефіцієнт температурного лінійного розширення і коефіцієнт Пуассона оброблюваного матеріалу;  $A_1$  і  $x_2$  - величини, що визначають значення температури в поверхневому шарі оброблюваної деталі;  $a_i$  - змінна товщина зрізу при зустрічному зубофрезеруванні;  $a_i = S_z \sin \Psi \sin \varphi$ ;  $S_z$  - подача на зуб;  $\varphi$  - кут профілю зуба фрези.

Залишкові напруги, обумовлені силовим впливом на поверхневий шар, визначаються відповідно до теореми Генки про розвантаження як різниця напруги, що виникають при навантаженні  $\sigma_{\text{фнкт}}$  і розвантаження  $\sigma_{\text{нр.т}}$ . Залишкові напруги визначалися за формулами (6):

$$\sigma_x = -\frac{\tau_p}{2\pi} \left\{ \psi_1 \left[ B; \frac{y}{h}; \frac{h}{a_1} \right] - \frac{b}{b_1 \cos \alpha} \xi_2 \left[ \frac{y}{h}; B; \frac{\Delta}{\Delta_1} \right] \right\} \frac{1}{1-\mu^2};$$

$$\sigma_y = -\frac{\tau_p}{2\pi} \left\{ \psi_2 \left[ B; \frac{y}{h}; \frac{h}{a_1} \right] - \frac{b}{b_1 \cos \alpha} \xi_2 \left[ \frac{y}{h}; B; \frac{\Delta}{\Delta_1} \right] \right\} \frac{1}{1-\mu^2}; \quad (6)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{\tau_p}{2\pi} \left\{ \psi_3 \left[ B; \frac{y}{h}; \frac{h}{a_1} \right] - \frac{b}{b_1 \cos \alpha} \xi_3 \left[ \frac{y}{h}; B; \frac{\Delta}{\Delta_1} \right] \right\} \frac{1}{1-\mu^2},$$

де  $\tau_p$  - опір оброблюваного матеріалу пластичного зсуву;  $b_i$  - ширина зрізу;  $b$  - периметр робочих частин різальних крайок;  $\Delta$  - довжина площадки контакту задньої поверхні фрези з оброблюваною поверхнею;  $\Delta_1$  - проекція

поверхні зсуву на горизонтальну площину;  $h$  - глибина залягання випереджальних пластичних деформацій в поверхневому шарі;  $B$  - критерій, що характеризує кут сходу стружки;  $\alpha$  і  $\gamma$  - задній і передній кути фрези.

Справжні напруги визначаються також за формулами (7) за умови, що у відповідає глибини залягання пластичних деформацій. Умова пластичності визначається по теорії М. Хубера - Р. Мізеса.

При аналізі шорсткості обробленої поверхні на формування нерівностей обробленої поверхні при зустрічному фрезеруванні впливають радіус округлення різальної крайки зубів фрези  $\rho$ , параметри інструменту, змінна в часі геометрія перетину зрізу  $a_i = S_z \sin \Psi \sin \varphi$ , обсяг і швидкість деформування металу, обумовлені комплексом температурно-силових явищ, що виникають в зоні різання (рис. 1).

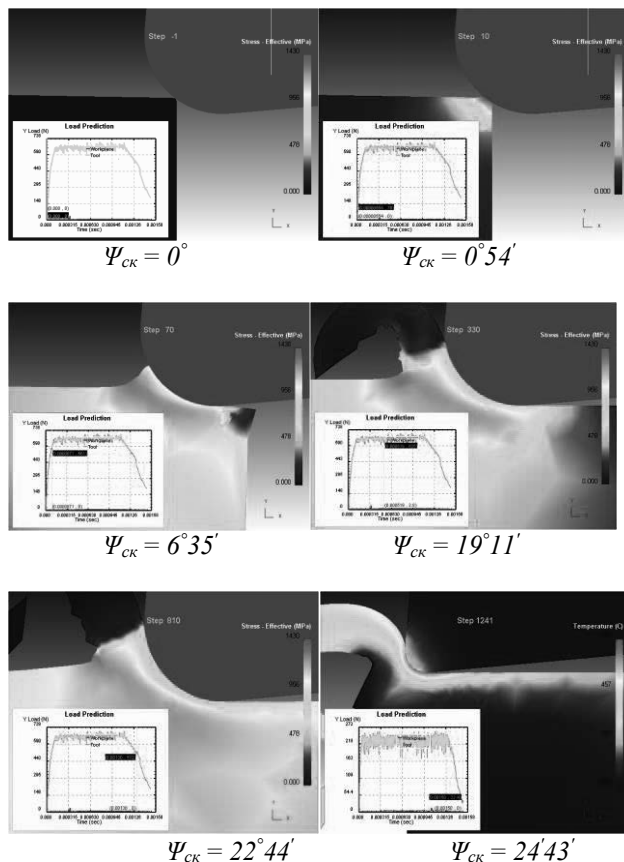


Рис. 1 - Послідовність моделювання

формування глибини залягання залишкових напруг поверхнього шару  $h_c$  і сходу стружки при швидкісному зубофрезерування при значеннях радіуса округлення різальної крайки зубів фрези  $\rho = 0 \div 300$  мм в залежності від кута ковзання  $\Psi_{ск}$

З урахуванням цього:

$$R_z = \left\{ \frac{a_i^{0,125} b_1^{0,7} c \rho^{0,1} a^{0,43} \left[ 2,85 \sin^{0,115} \alpha V^{0,57} a_1^{0,345} b^{0,3} + 0,6625 \lambda \rho^{0,57} \rho^{0,075} \right]}{V \lambda \sin^{0,165} \alpha} \right. \\ \left. - 0,5 r \rho \cdot b \left[ \arccos \left( 1 - a_2 B^{-b_2 (1 - \sin \gamma)^{-x_2}} \right) + \frac{a_2 B^{1-b_2 (1 - \sin \gamma)^{-x_2}}}{\sin \alpha (\cos \gamma + B \sin \gamma)} + \frac{\delta}{\rho} \right] \cos \alpha \right. \\ \left. \cdot \frac{1}{K \rho} \right\} \cdot \frac{1}{t \tau \rho \left[ 1 + \frac{1}{B} + \lg(\arctg B - \gamma) \right]}$$

де  $K\rho$  - коефіцієнт ефективності формооброзовання поверхнього шару;  $c\rho$  - питома об'ємна теплоємність оброблюваного матеріалу;  $\theta$  - температура в зоні різання;  $\rho_i$  - радіус округлення різальної крайки фрези;  $t$  - глибина різання;  $\delta$  - довжина площадки зносу по задній поверхні фрези;  $\alpha$  - коефіцієнт температуропровідності оброблюваного матеріалу;  $V$  - швидкість різання;  $\lambda$  і  $\lambda\rho$  - коефіцієнти теплопровідності оброблюваного та інструментального матеріалів;  $\varphi$  - кут вихідного профілю  $20^\circ$ ;  $a_1$  і  $a_2$  - величини, що залежать від умов обробки (кут сходу стружки).

Глибина наклепу обробленої поверхні  $h_c$  приймається рівною глибині залягання пластичних деформацій. Виникнення пластичних деформацій в поверхневому шарі обумовлено одночасним впливом силового і температурного факторів. У цьому випадку глибина залягання пластичних деформацій визначається з умови рівності межі текучості алгебраїчної суми напруг в поверхневому шарі, обумовленому силовим і температурним впливом, а саме

$$\sigma_y + \sigma_H = \sigma_T, \quad (8)$$

$$\text{де } \sigma_{\text{ост.т}} = \frac{\beta_d A_1 E_d}{1-\mu} \left\{ \left( \frac{H-y+a_1}{a_1} \right)^{x_2} - \frac{a_1^{1+x_2} - (H+a_1)^{1+x_2}}{a_1^{x_2} (1+x_2) H} \right\} \quad (9)$$

$$\sigma_T = -\frac{\tau_p}{2\pi} \left\{ \frac{1+B \operatorname{tg}(\arctg B - \gamma)}{B \cos \left( \frac{\pi}{2} - 2 \arctg B \right) + \sin \left( \frac{\pi}{2} - 2 \arctg B \right)} \cos \left( \frac{\pi}{2} - 2 \arctg B \right) \times \left[ 2 \arccos \frac{B+B \frac{y}{a_1}}{\sqrt{1+(B+B \frac{y}{a_1})^2}} - \sin \left( \frac{\pi}{2} - 2 \arctg B \right) + \frac{2(B+B \frac{y}{a_1}) \left[ 2 \sin^2 \left( \frac{\pi}{2} - 2 \arctg B \right) - 1 \right] + \sin 2 \left( \frac{\pi}{2} - 2 \arctg B \right) \left( (B+B \frac{y}{a_1})^2 \right)}{1+(B+B \frac{y}{a_1})^2} \right] \right\} - \\ - \frac{\tau_p b}{2\pi b_1 \cos \alpha} \left[ \frac{2}{\sin 2 \left( \frac{\pi}{2} - 2 \arctg B + \gamma \right)} \arccos \frac{1}{\sqrt{1+\left( \frac{B}{y/a_1} \right)^2}} + 1 - \frac{\pi}{2} \frac{2 - \frac{\pi}{2} \sqrt{1+\left( \frac{B}{y/a_1} \right)^2}}{\sqrt{1+\left( \frac{B}{y/a_1} \right)^2}} + \right. \\ \left. + \frac{2}{\operatorname{tg} 2 \left( \frac{\pi}{2} - 2 \arctg B + \gamma \right)} \frac{\sqrt{1+\left( \frac{B}{y/a_1} \right)^2}}{\sqrt{1+\left( \frac{B}{y/a_1} \right)^2}} \right] \quad (10)$$

Таким чином, глибина наклепаного шару  $h_c$  функціонально визначається

$$h_c = f(\sigma_T, E_D, \tau_p, \mu, \beta_D, \lambda, \lambda\rho, c\rho, V, S_{\min}, \rho, \alpha_i, \alpha)$$

Встановлено, що при обробці конструкційних і легованих сталей ступінь наклепу з достатньою для практичних цілей точністю може визначатися за формулою

$$N = \frac{h_c}{1,25 \cdot \left( \frac{\sigma_e}{\sigma_{ал}} \right)^{0,8}} \cdot 100\%$$

де  $\sigma_e$  - межа міцності оброблюваного матеріалу;  $\sigma_{ал}$  - межа міцності легованих сталей циліндричних зубчастих коліс.

Результати досліджень дозволяють вирішувати завдання по визначенню параметрів поверхневого шару оброблюваної деталі, а також призначати технологічні умови обробки, що забезпечують задані технічними умовами параметри поверхневого шару.

Методика вибору, призначення, технологічного і метрологічного забезпечення системи параметрів поверхневого шару циліндричних крупномодульних зубчатих коліс показує, що експлуатаційні властивості циліндричних крупномодульних зубчатих коліс в значній мірі визначаються системою параметрів їх поверхневого шару.

Проведені дослідження дозволили встановити між ними як якісні, так і кількісні залежності, ступінь достовірності яких цілком задовольняє вимогам практики.

Також існує реальна можливість технологічного управління формуванням обраної системою параметрів поверхневого шару циліндричних зубчастих коліс при їх виготовленні. Ця можливість може бути реалізована за допомогою раціонального вибору для кожного конкретного випадку методів і режимів попередньої і остаточної обробки з урахуванням технологічної спадковості.

В умовах середньосерійного виробництва призначення методів і режимів обробки циліндричних крупномодульних зубчатих коліс виробляється на стадії технологічної підготовки при розробці операційного технологічного процесу. При дрібносерійному і одиничному виробництві на стадії технологічної підготовки виробництва здійснюється розробка маршрутного технологічного процесу з призначенням тільки методів обробки. Розрахунок режимів обробки виконується за укрупненими нормативами або встановлюються безпосередньо самим зубооброблювальником вже в процесі виконання зубообробки.

Звідси випливає, що встановлення оптимальних методів і режимів зубообробки, що забезпечують необхідні точність, стан поверхневого шару і стійку роботу технологічної системи при найменшій собівартості, є одним з найважливіших етапів технологічної підготовки в умовах дрібносерійного і одиничного виробництва. Встановлення оптимальних режимів різання при розробці операційного технологічного процесу засновані на спільному вирішенні системи нерівностей, що характеризують вплив основних обмежень на режими різання і представляють математичні моделі даного процесу [2, 4; 6; 7; 8; 9].

Однак, основним недоліком існуючої методики автоматичного розрахунку оптимальних режимів обробки є недостатнє відображення в системі технічних вимог, що пред'являються до стану поверхневого шару оброблюваних деталей, а отже, і до їх експлуатаційними властивостями. Звідси випливає, що існуюча методика автоматичного проектування технологічних процесів і розрахунку зубообробки не дозволяє вирішити задачу технологічного забезпечення експлуатаційних властивостей зношених і відновлених великогабаритних зубчастих коліс

стадії технологічної підготовки виробництва і вимагає певного доопрацювання або корінного її зміни.

Що ж стосується завдання встановлення режимів різання в умовах одиничного виробництва, то її рішення в даний час, як правило, засноване на використанні укрупнених нормативів і досвіді верстатника, який головним чином має на меті підвищення продуктивності праці, часто ігноруючи питання зменшення собівартості і точного дотримання шорсткості, необхідної за кресленням. Якщо раніше, коли на кресленнях проставляється клас чистоти, досвідчені верстатники ще могли забезпечити необхідну «чистоту», то в даний час при вказанні на кресленнях вимог до ряду параметрів це завдання не під силу навіть досвідченим робочим. Вирішення цього завдання може бути значно полегшено з використанням систем адаптивного управління якістю оброблюваної поверхні [2; 3; 5].

Для забезпечення якості виготовлення циліндричних зубчатих коліс на стадії конструкторсько-технологічної підготовки виробництва розроблені два шляхи: призначати методи і режими обробки циліндричних зубчатих коліс, виходячи з вимог до їх експлуатаційними властивостями, що визначає точність і надійність важких токарних верстатів; детально розробляти технологічний процес обробки циліндричних зубчатих коліс, що дозволяє отримати необхідні точність розмірів і систему параметрів їх робочих поверхонь, задані кресленням, які забезпечують необхідні експлуатаційні властивості.

Перший шлях коротше, однак він не дозволяє використовувати наявні результати теоретичних і експериментальних досліджень з оцінки експлуатаційних властивостей циліндричних зубчатих коліс вже виготовлених вузлів, редукторів, систем приводів важких токарних верстатів, а також використовувати накопичений досвід по технологічному забезпеченню якості оброблюваних поверхонь. При цьому немає чіткого розмежування між функціями конструктора і технолога, так як конструктор, виходячи з необхідних експлуатаційних властивостей, сам повинен призначати методи і режими обробки. Це, природно, абсолютно неприйнятно для умов одиничного і дрібносерійного виробництва. Крім того, в даний час функції відділів конструктора і технолога розмежовані, тому доцільність вирішення даного завдання по першому шляху в даний час утруднена, хоча таке рішення принципово можливо і в майбутньому має знайти своє місце.

Другий шлях - двоступеневий, він більш універсальний, дозволяє одночасно забезпечувати кілька експлуатаційних властивостей циліндричних зубчастих коліс, що визначають точність і надійність важких металорізальних верстатів, а також використовувати розробляються алгоритми і програми по розрахунку оптимальних параметрів стану поверхонь, що сполучаються в умовах серійного, дрібносерійного і одиничного виробництва. З'являється можливість застосовувати вже наявні

результати теоретичних і експериментальних досліджень надійності випускаються важких токарних верстатів, а також досвід підприємств по технологічному забезпеченню якості оброблюваних поверхонь циліндричних зубчастих коліс, розрахунку оптимальних режимів різання і використання моделювання технологічних процесів оптимального управління параметрами точності, якості і продуктивності зубообробки зношених і відновлених великогабаритних зубчастих коліс інтегруванням за допомогою фазового простору.

Таким чином, технологічне забезпечення експлуатаційних властивостей циліндричних зубчастих коліс в даний час визначається рішенням двох завдань: вибору матеріалу циліндричних зубчастих коліс і обґрунтування призначення точності розмірів і системи параметрів стану поверхневого шару, які забезпечували б необхідні експлуатаційні властивості, вибір методу і встановлення раціональних режимів обробки, забезпечують найбільш економічне отримання заданої точності розмірів і системи параметрів стану поверхневого шару оброблюваних циліндричних зубчастих коліс.

Неважко бачити, що перша з них є завданням конструктора і, незалежно від умов виробництва, повинна вирішуватися на стадії конструкторсько-технологічної підготовки виробництва.

Друга ж - завдання технолога, її перша частина (вибір методу обробки для всіх виробництв) також вирішується на стадії конструкторсько-технологічної підготовки виробництва; друга частина (встановлення оптимальних режимів обробки) для масового, великосерійного і серійного виробництв вирішується при конструкторсько-технологічній підготовці виробництва, для одиничного і дрібносерійного виробництва - безпосередньо на робочому місці при обробці.

Однак з цього не випливає, що отримання необхідних параметрів поверхневого шару циліндричних зубчастих коліс в умовах масового, великосерійного і серійного виробництва не залежить від робітника. Ця залежність чисто організаційна і полягає у виконанні робочим заданих технологом умов обробки; т. е. в дотриманні технологічної дисципліни.

**Висновки.** Узагальнена модель технологічного процесу виготовлення циліндричних зубчастих коліс забезпечує побудову оптимальної математичної моделі управління процесом формування поверхневого шару загартованих крупномодульних зубчастих коліс. В основі аналізу оптимізації технологічного процесу як об'єкта управління і вибору класу математичної моделі лежать закономірності протікають в них явищ, а також завжди апріорна інформація про процеси в подібних об'єктах.

Розроблено процес моделювання роботи циліндричних крупномодульних загартованих коліс в порівнянні з результатами теоретичних досліджень і даними, отриманими на експериментальних установках і при дослідженні на «робочих осях» та визначено оптимальні значення параметрів стану робочих

поверхонь циліндричних крупномодульних коліс, що забезпечують необхідні експлуатаційні властивості.

#### Список литературы

1. Базров, Б. М. Основы технологии машиностроения / Б. М. Базров. – М. : Машиностроение, 2005. – 736 с.
2. Анализ параметров поверхностного слоя закаленных крупномодульных зубчатых колес, характеризующих их эксплуатационные свойства / Е. В. МIRONENKO, А. А. КЛОЧКО, А. Д. КОШЕЛЕВА, И. Г. ГОДУЗЛА // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – Вып. 31. – С. 118–131.
3. Шелковой А. Н. Технологическое обеспечение заданной системы параметров поверхностного слоя цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. Н. Шелковой, Ю. В. Тимофеев, А. А. Клочко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : зб. наук. пр. Тематичний випуск : Різання та інструмент в технологічних системах. – Харків : НТУ ХПІ, 2013. – № 83. – С. 286–295.
4. Методология разработки модели управления точностью, качеством и производительностью формообразования при обработке закаленных крупномодульных зубчатых колес / Ю. В. Тимофеев, А. Н. Шелковой, Е. В. МIRONENKO, А. А. Клочко // Сборник научных трудов “Проблемы проектирования и автоматизации в машиностроении: сборник научных трудов [Текст] / Донбасская государственная машиностроительная академия; Закрытое акционерное общество «ОНИКС». – Краматорск: ДГМА, Ирбит: ЗАО «ОНИКС», Серия: «Проектирование и применение режущего инструмента в машиностроении» / Общ. ред. Ю.М. Соломенцев). 2014. – С. 96–117. ISBN 978-5-906703-03-3.
5. Клочко А.А. Технологическое обеспечение трения качения и трения скольжения в зубчатых передачах / А.А. Клочко, М.И. Гасанов, Е.В. Басова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – №40 (1149). С. 102–107. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-004X.
6. John Cooper, Bruce DeRuntz. The Relationship Between the Workpiece Extension Length/Diameter Ratio and Surface Roughness in Turning Applications, Journal of Industrial Technology, Volume 23, Number 2, April 2007 through June 2007, p.p. 2 – 7.
7. Пермяков А.А. Анализ погрешностей технологических процессов обработки отверстий с перекрещивающимися и пересекающимися осями корпусных деталей тяжелых токарных станков / А.А. Пермяков, А.А.Клочко, М.И.Гасанов // Обладнання і технології сучасного машинобудування: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції, Україна, м.Тернопіль, 11–12 травня 2017. м.Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. – С. 188.
8. Шелковой А.Н. Обеспечение эксплуатационных свойств закаленных зубчатых колес / А.Н. Шелковой, А.А. Клочко, М.И. Гасанов // Вестник современных технологий: сб. науч. тр. – Севастополь : ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2017. – Вып. 8. – С. 61–70.
9. Шелковой А. Имитационное моделирование в задачах механосборочного производства /А. Шелковой, А. Клочко, Е. Набока // – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 528 с.: ил. На русском языке. ISBN-13: 978-3-659-69172-0, ISBN-10: 3659691720, EAN:9783659691720.
10. Клочко А.А. Новые способы высокоскоростной обработки закаленных цилиндрических зубчатых колес абразивным инструментом / А.А. Клочко, М.И. Гасанов, О.А. Анцыферова // Информатика, управління та штучний інтелект. Матеріали четвертої міжнародної науково-технічної конференції студентів, магістрів та аспірантів. – Харків: НТУ «ХПІ». 2017. – С. 54–55.

#### References (transliterated)

1. Bazrov B.M. The fundamentals of engineering technology. *M.: Mechanical Engineering*, 2005. - 736 p.
2. MIRONENKO E.V., KLOCHKO A.A., KOSHELEVA A.D., GODUZLA I.G. Analysis of the parameters of the surface layer of quenched coarse-grained cogwheels, characterizing their operational properties.

- Instrument reliability and optimization of technological systems: coll. sci. tr. - Kramatorsk: DGMA, 2012. - Issue. 31. - P. 118-131*
- 3 Mironenko E.V., Klochko A.A., Kosheleva A.D., Goduzula I.G. Informational modeling of technological processes of gear processing of hardened coarse-grained cogwheels. *Instrument reliability and optimization of technological systems: coll. sci. tr. - Kramatorsk: DGMA, 2012. - Issue. 32. - P. 351-358.*
  - 4 Shelkovi A.N., Timofeev Y.V., Klochko A.A. Technological support for a given system of parameters of the surface layer of cylindrical hardened large-modular gears. *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute": SB . sciences etc. Thematic issue: Cutting and the tool in technological systems. - Kharkiv: NTU KhPI, 2013. - No. 83. - p. 286-295.*
  - 5 Timofeev Y.V., Shelkovi A.N., Mironenko E.V., Klochko A.A. Methodology for the development of a model for controlling the accuracy, quality, and productivity of shaping during the processing of hardened coarse-grained cogwheels. Collected scientific works "Design problems and automation in mechanical engineering: a collection of scientific papers [Text] Donbass State Machine-Building Academy; Closed Joint Stock Company "ONYX". - Kramatorsk: DGMA, Irbit: ZAO ONYX, Series: "Design and application of cutting tools in engineering" Ed. Yu.M. Solomentsev). 2014. - P. 96-117. ISBN 978-5-906703-03-3
  - 6 Klochko A.A., Hasanov M.I., Basova E.V. Technological support of friction of friction and friction of sliding in gear gears. *Bulletin of the NTU "KhPI". Series: Technology in Mechanical Engineering. - Kh. NTU "KhPI", 2015. - №40 (1149). Pp. 102-107. - Bibliographer: 8 titles. - ISSN 2079-004X.*
  - 7 John Cooper, Bruce DeRuntz. The Relationship Between the Workpiece Extension Length/Diameter Ratio and Surface Roughness in Turning Applications, *Journal of Industrial Technology, Volume 23, Number 2, April 2007 through June 2007*, p.p. 2 – 7.
  8. Permyakov A.A., Klochko A.A., Hasanov M.I. Analysis of errors of technological processes of processing of openings with cross-crossing and crossing in axes of body parts of heavy lathes. *Equipment and Technologies of Contemporary Engineering: Materials of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference, Ukraine, Ternopil, May 11-12, 2017. Ternopil: Ternopil National Technical University named after Ivan Puluj, 2017. - Issue. 8. - P. 188.*
  9. Shelkovi A.N., Klochko A.A., Hasanov M.I. Maintenance of operational properties of hardened cogwheels Bulletin of modern technologies: Sat. sci. tr. - Sevastopol: FGAOU VO "Sevastopol State University", 2017. - Issue. 8. - P. 61-70.
  10. Shelkovoy A., Klochko A., Naboka E. Simulation modeling in the tasks of mechanical assembly production. *Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. - 528 p. : ill. In Russian. ISBN-13: 978-3-659-69172-0, ISBN-10: 3659691720, EAN: 9783659691720*

Поступила (received) 14.05.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Гасанов Магомедмін Ісамагомедовіч (Гасанов Магомедэмин Исамагомедович, Magomedemin Hasanov)** – проректор по науково-педагогічній роботі, кандидат технічних наук, професор, кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати, проректор Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (067)-689-0342; e-mail: fokusnic1@rambler.ru;

**Клочко Олександр Олександрович (Клочко Александр Александрович, Alexander Klochko)** – доктор технічних наук, професор кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (067) 936-36-64; e-mail: ukrstanko21@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2841-9455

**Заковоротний Олександр Юрійович (Заковоротный Александр Юрьевич, Aleksandr Zakovorotnyi)** – доктор технічних наук, доцент кафедри обчислювальна техніка та програмування Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (097) 967-32-71.

**Пермінов Євген Віталійович (Перминов Евгений Витальевич, Yevhen Perminov)** – аспірант кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (099)-238-5845; e-mail: gekauta@gmail.com.